

黄土高原典型流域退耕还林土地利用变化及其合理性评价

汪 滨, 张志强*

(1. 北京林业大学水土保持学院, 国家林业局水土保持与荒漠化防治重点实验室, 北京 100083;
2. 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 临汾 042200)

摘 要: 黄土高原大规模退耕还林使得该区土地利用结构发生了深刻变化, 区域生态环境得到了明显改善。研究由此引起的土地利用变化及其合理性, 对于加快黄土高原植被恢复、控制黄河泥沙以及实现区域经济社会可持续发展等具有十分重要的理论意义和应用价值。该文应用遥感(remote sensing, RS)和地理信息系统(geographic information system, GIS)技术对黄土高原典型流域清水河流域 2000—2014 年土地利用变化特征进行了分析, 并通过构建判别准则体系对土地利用变化的合理性进行了评价。结果表明, 该流域实施退耕还林工程以来, 土地利用结构发生了重大变化, 主要土地利用类型耕地、园地、林地和草地的比例由 2000 年的 1: 0.06: 2.05: 3.95 大幅度调整至 2014 年的 1: 3.22: 12.03: 5.51, 其变化经历了 3 个阶段: 2000—2005 年以退耕还林及其配套措施为主, 重点突出了工程的生态效益, 土地利用变化合理度为 78.60%, 属于低度合理; 2006—2009 年在继续推进荒山造林和封禁的同时, 大力开展基本农田与果园建设, 兼顾了生态、经济与社会效益, 土地利用变化合理度为 91.71%, 进入高度合理状态; 2010—2014 年进一步加大苹果产业发展力度, 重点突出了经济效益, 土地利用变化合理度为 95.20%, 延续了高度合理态势。建议新一轮退耕还林工程应注意严格控制新的退耕, 保护经营好现有林地, 适当控制园地规模。

关键词: 土地利用; 遥感; 植被; 退耕还林; 合理度; 黄土高原

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.031

中图分类号: X171.4; F301.24

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-07-0235-11

汪 滨, 张志强. 黄土高原典型流域退耕还林土地利用变化及其合理性评价[J]. 农业工程学报, 2017, 33(7): 235—245.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.031 <http://www.tcsae.org>

Wang Bin, Zhang Zhiqiang. Land use change driven by Sloping Land Conversion Program in typical watershed on Loess Plateau and its rationality evaluation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(7): 235 — 245. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.031 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

黄土高原是世界上水土流失最严重的地区^[1]。长期的植被破坏和不合理土地利用导致该区土地资源质量及生物生产力不断下降, 生态环境持续退化, 水土流失愈加重并成为黄河下游河道泥沙不断淤积的根源^[2-3]。新中国成立特别是改革开放以来, 以生物措施、工程措施、农业措施与其它管理措施相结合的小流域综合治理在黄土高原取得了显著成效^[4-6]。1999 年起国家实施了大规模的退耕还林工程并于 2014 年起启动了新一轮的退耕还林。通过第 1 轮工程的实施, 黄土高原林草植被覆盖已大幅度增加, 在有效治理土壤侵蚀、减少入黄泥沙、增加碳储量和碳汇、提高区域生物多样性等方面发挥了重要作用^[7-8], 同时农业产业结构得到了调整, 农民收入水平进一步提高^[9]。有研究表明, 尽管黄河干流泥沙已大幅

度减少, 但随着现有淤地坝、水库等工程措施承淤能力的逐步减小, 退耕还林植被恢复与重建将成为黄河泥沙治理的关键^[10]。由于黄土高原退耕还林还草肩负着改善生态环境与实现农民脱贫致富的双重任务, 仅仅研究退耕还林的生态环境效应显然不能够为工程的深入推进提供坚实的理论基础, 因而构建基于兼顾生态效益和经济、社会效益的土地利用合理性判别准则, 研究退耕还林引起的土地利用变化及其合理性, 对于制定新一轮退耕还林工程实施方案, 加快黄土高原植被恢复、控制黄河泥沙以及实现区域经济社会可持续发展等具有十分重要的理论意义和应用价值。

目前土地利用变化在时空分布及驱动力等方面已经有了大量研究^[11-12], 但其合理性分析尚属非常薄弱的环节, 且已有研究主要侧重土地利用结构变化的合理性^[13]和土地利用变化的合理度及分级标准^[14]上, 缺乏地类之间转化合理性评价的系统判别依据。本文以山西省吉县清水河流域为对象, 应用遥感(remote sensing, RS)解译与地理信息系统(geographic information system, GIS)空间分析手段, 分析该流域退耕还林 15 a 间土地利用的动态变化, 并采用土地利用变化合理度概念构建判别准则体系, 评价其不同阶段变化的合理性, 进而提出新一轮退耕还林工程主要土地利用类型的调控建议。

收稿日期: 2016-10-04 修订日期: 2017-04-10

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAD07B030303)

作者简介: 汪 滨, 男, 博士生, 湖北武汉市新洲区人, 主要研究方向为林业生态工程与流域生态水文。北京 北京林业大学水土保持学院, 100083。
Email: wangb060577@163.com

*通信作者: 张志强, 男, 教授, 内蒙古呼和浩特市人, 博士生导师, 主要从事森林水文、土壤侵蚀与流域管理等方面的研究。北京 北京林业大学水土保持学院, 100083。Email: Zhqzhang@bjfu.edu.cn

1 研究区域概况

清水河发源于山西省吉县高天山西麓,向西南直接注入黄河。吉县水文站控制的清水河流域地理坐标为 $110^{\circ}36'47''\sim 110^{\circ}56'0''E$ 、 $36^{\circ}2'18''\sim 36^{\circ}16'23''N$ (图1),跨吉县、乡宁县,总土地面积 436 km^2 ,其中吉县境内面积占 94.67%。属暖温带大陆性气候,年平均气温 $10.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,年平均降水量 541.5 mm ,年内降水不均,5~10月降雨占全年降水的 85.25%。该流域地处晋西黄土高原南部,相对高差较大,属黄土残塬沟壑区,除东部山区(主峰高天山海拔高度为 $1\,820\text{ m}$)和西北部山区(主峰人祖山海拔 $1\,742\text{ m}$)外,流域水土流失一直非常严重。该流域于 2000 年下半年起实施退耕还林工程,2005 年完成第 1 阶段退耕和造林任务。从 2008 年起进入退耕还林工程巩固成果阶段,期间吉县在继续实施荒山造林和封禁的同时大力开展坡改梯工程与基本农田建设,2010 年起进一步加大了具有地方传统和优势的苹果产业的发展力度,至 2014 年完成了第 1 轮退耕还林工程。为此,以 2000、2005、2010 和 2014 年 4 个标志年份为节点,将清水河流域第 1 轮退耕还林土地利用变化分为 2000—2005、2006—2009 和 2010—2014 年 3 个阶段。

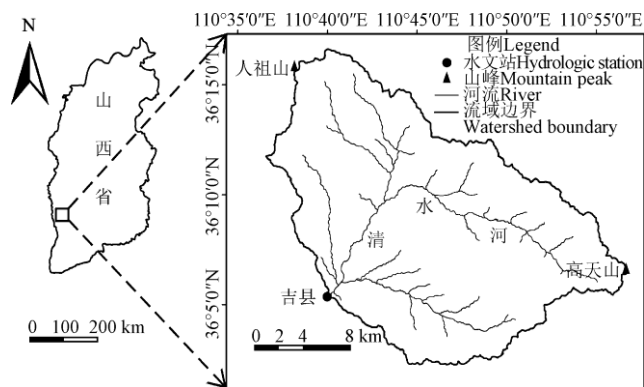


图1 研究区位置

Fig.1 Location of study area

2 数据来源与研究方法

2.1 数据收集与土地利用分类

为完整反映流域第 1 轮退耕还林 3 个阶段的土地利用变化,综合考虑年份、季节及影像云量,选取 2000 年 5 月 21 日 Landsat7、2005 年 6 月 12 日 Landsat5、2011 年 6 月 29 日 Landsat5 和 2014 年 5 月 20 日 Landsat8 影像分别作为退耕还林前及退耕还林以来 4 个标志年份的代表影像(因 G22 临吉高速公路建设对 2010 年沿线地区土地利用的影响较大,故用 2011 年影像替代)。辅助数据包括 2011 年公布的第 2 版 ASTER GDEM 影像、2005 年的吉县和乡宁县 1:100 000 比例尺土地利用图。4 期遥感影像和 DEM 影像来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/),两县 2005 年的土地利用图来源于中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn/)的中国土地利用现状遥感监测数据库。

土地利用分类以中国土地利用现状遥感监测数据库中的土地利用分类系统为基础,并参照土地利用现状分

类国家标准(GB/T 21010-2007),通过归并最终将土地利用类型划分为耕地、园地、有林地、疏林地、灌木林地、草地、建设用地和水域 8 类。本文后续分析中的林地有林地、疏林地和灌木林地的统称。

2.2 遥感数据处理

应用 ERDAS9.2 对遥感影像进行波段合成、图像融合、图像增强、研究区截取及统一坐标系等预处理,根据 2005 年土地利用图建立各土地利用类型的解译特征标志,采用最大似然法进行监督分类,得到 4 期原始土地利用空间分布图。为减少影像混合光谱信息对分类的影响,提高解译精度,利用 Google Earth 高分辨率影像对监督分类结果进行修正。以 2014 年影像为例,具体过程如下:应用 ArcGIS9.3 将经过聚类统计、去除分析等分类后处理的土地利用空间分布图转为 Shape 格式,并将斑块按照面积由大到小依次排列,使用 Select 工具提取斑块并转为 KML 格式;在 Google Earth 中,将导入斑块的显示样式设置为轮廓,点击“显示历史图像”按钮,选择 2014 年 5 月影像,结合前期野外实地 GPS 采点数据对斑块的土地利用进行目视判读;在 ArcGIS9.3 中,以图像增强后的影像为底图,使用 Cut polygon features 工具对该斑块进行修正并赋予正确的地类编号。修正完成后,利用野外实地采点数据、地块利用历史实地访问调查结果以及 2005 年土地利用图,对 4 期分类结果进行精度检验,各期影像的总体解译精度均达到 90% 以上。最后对 4 期土地利用矢量图进行拓扑检查,确保各地类斑块之间不会出现重叠或缺失。

2.3 土地利用动态变化分析

土地利用动态变化包括土地资源数量、质量随时间的变化,也包括土地利用的空间变化及土地利用类型组合方式的变化^[15]。本文通过土地利用结构和土地利用转移 2 个途径,分析了土地利用变化的基本特征。

2.3.1 土地利用结构

土地利用结构是指在一定区域内各种土地利用类型的空间分布格局及数量的比例关系^[16]。在 ArcGIS9.3 中以 4 期土地利用空间分布图作为输入图层,使用 Summary Statistics 工具,对 4 期土地利用类型面积进行加和统计。

2.3.2 土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵不仅可以反映研究时段初期与末期的土地利用结构特征,还可以反映研究时段内各土地利用类型的转移变化情况,以便分析研究时段初期各类型土地的流向以及末期各土地利用类型的来源与构成^[17],其表达式为

$$S = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1n} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ s_{n1} & s_{n2} & \cdots & s_{nn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中 s_{ij} 为研究时段初期第 i 类土地利用类型转变为研究时段末期第 j 类土地利用类型的面积, n 为土地利用类型的数量。

利用 ArcGIS9.3 对 4 期土地利用空间分布图进行空间叠加分析,生成了 2000—2005、2005—2011、2011—2014

年 3 个时段的土地利用转移图层，并通过对属性表数据进行处理，得到 3 个时段的土地利用转移矩阵。

2.4 土地利用变化合理性评价

2.4.1 合理性判别准则及依据

本文以土壤侵蚀、植被演替研究结果以及国家相关法律、法规和政策为依据，构建了土地利用变化合理性判别准则体系。各地类变化的合理性判别准则详见表 1。

表 1 清水河流域土地利用变化合理性判别准则		
Table 1 Discriminant criterion for rationality of land use changes in Qingshuihe watershed		
土地利用类型 Land use type		判别准则 Discriminant criterion
调整前 Before adjustment	调整后 After adjustment	
耕地 Farmland	有林地、疏林地、灌木林地	25 °以上坡耕地强制退耕，转为优次顺序最高的有林地或较高的疏林地与灌木林地，合理；15 °~25 °坡耕地水土流失严重，转为优次顺序最高的有林地或较高的疏林地与灌木林地，合理；15 °以下坡耕地应实施水土保持措施，以保障粮食安全，不合理
	草地	25 °以上坡耕地强制退耕，应转为林草地中优次顺序更高的林地，转为草地属于合理范畴；15 °~25 °坡耕地水土流失严重，应转为优次顺序更高的林地，转为草地属于合理范畴；15 °以下坡耕地应实施水土保持措施，以保障粮食安全，不合理
	园地	25 °以上坡耕地强制退耕，建设具有水土保持措施的果园，合理，否则不合理；25 °以下坡耕地建设具有水土保持措施的果园有利于治理水土流失和发展苹果主导产业，属于合理范畴，否则不合理
	建设用地	通过环评或审批后征用，属于合理范畴，否则不合理
园地 Orchard	耕地	25 °以上垦殖不符合有关法律，不合理；25 °以下建设梯田，有利于粮食安全和耕地占补平衡，属于合理范畴，否则不合理
	有林地	符合退耕还林生态优先方针，合理
	疏林地、灌木林地、草地	不符合退耕还林适当发展经济林的政策，不合理
	建设用地	通过环评或审批后征用，属于合理范畴，否则不合理
有林地 Woodland	耕地	属于毁林，与退耕还林宗旨相悖，不合理
	疏林地、灌木林地、草地	属于毁林，且属于植被的逆向演替，不合理
	园地	属于毁林，与退耕还林生态优先方针相悖，不合理
	建设用地	通过环评或审批后征用，属于合理范畴，否则不合理
疏林地 Sparse woodland	耕地	25 °以上垦殖不符合有关法律，不合理；25 °以下建设梯田，有利于粮食安全和耕地占补平衡，属于合理范畴，否则不合理
	有林地	通过补植、封育等措施，有利于提高植被覆盖率，同时符合植被演替规律，合理
	灌木林地、草地	属于毁林，且属于植被的逆向演替，不合理
	园地	符合退耕还林适当发展经济林的政策，建设具有水土保持措施的果园有利于发展苹果主导产业，属于合理范畴，否则不合理
灌木林地 Shrubland	建设用地	通过环评或审批后征用，属于合理范畴，否则不合理
	耕地	25 °以上垦殖不符合有关法律，不合理；25 °以下建设梯田，有利于粮食安全和耕地占补平衡，属于合理范畴，否则不合理
	有林地、疏林地	通过补植、封育等措施，有利于提高植被覆盖率，同时符合植被演替规律，合理
	草地	属于毁林，且属于植被的逆向演替，不合理
草地 Grassland	园地	符合退耕还林适当发展经济林的政策，建设具有水土保持措施的果园有利于发展苹果主导产业，属于合理范畴，否则不合理
	建设用地	通过环评或审批后征用，属于合理范畴，否则不合理
	耕地	25 °以上垦殖不符合有关法律，不合理；25 °以下建设梯田，有利于粮食安全和耕地占补平衡，合理，否则不合理
	有林地、疏林地、灌木林地	通过造林、封育等措施，有利于植被恢复与减轻水土流失，同时符合植被演替规律，合理
建设用地 Construction land	园地	符合退耕还林适当发展经济林的政策，建设具有水土保持措施的果园有利于治理水土流失和发展苹果主导产业，合理，否则不合理
	建设用地	通过环评或审批后征用，合理，否则不合理
	耕地	25 °以上复垦不符合有关法律，不合理；根据有关法规和部令精神，25 °以下建设梯田，有利于粮食安全和耕地占补平衡，合理，否则不合理
	有林地、疏林地、灌木林地	根据有关法规和部令精神，废弃工矿用地、城镇与农村闲置土地等转为林草地中优次顺序最高的有林地或较高的疏林地与灌木林地，有利于提高土地利用率和增加植被覆盖率，合理，否则不合理
	草地	根据有关法规和部令精神，废弃工矿用地、城镇与农村闲置土地等应转为林草地中优次顺序更高的林地，转为草地有利于恢复植被并增加植被覆盖率，属于合理范畴，否则不合理
	园地	根据有关法规和部令精神，废弃工矿用地、城镇与农村闲置土地等建设为具有水土保持措施的果园，有利于提高土地利用率和增加植被覆盖率，合理，否则不合理

1) 耕地。研究表明，黄土高原坡度是影响土壤侵蚀的最主要地形因子^[18]，土壤侵蚀量与坡度呈正相关关系，坡度大于 15 °后侵蚀强度明显增大^[19-20]，临界坡度一般介于 24 °~29 °之间^[21]。由于耕地是退耕还林主要针对的地

类，而粮食生产又与退耕农民的生活息息相关，故在判别其变化的合理性时，总体上应突出生态效益优先，但在坡度较小地块应兼顾经济效益，以确保工程的稳定运行。根据上述黄土高原土壤侵蚀的研究结果以及《退耕

还林条例》第十五条和第十六条、《水土保持法》第二十条的规定，将 25°作为退耕的下限限制坡度和合理垦殖的上限强制坡度，将 15°作为退耕的下限适宜坡度，15°以下则不应退耕，而应实施水土保持梯改、农业耕作等措施，以稳定粮食生产。流域内包括基本农田在内的川地、梯田不属于退耕范围，且基本农田受法律保护，故不进行评价。

2) 林地与草地。生态林草建设是退耕还林(草)工程的主要任务，林地和草地变化合理性的判别主要突出生态效益，但有林地、疏林地、灌木林地与草地的生态效益存在一定差异。由于流域所处地区属于造林适宜区，天然林和人工林的更新树种往往是顶级群落的建群种^[22]，根据黄土高原地区有关研究结果，植被演替的规律为草地→灌丛→森林^[23-24]，土壤侵蚀的严重程度一般为林地<草地^[25-27]，故将林草地的优先顺序确定为有林地、疏林地、灌木林地和草地。

3) 园地。流域果园发展较快，且都配套实施了如鱼鳞坑、反坡梯田等水土保持措施，在林地与园地的优先顺序方面，根据生态优先方针和《国务院关于进一步做好退耕还林还草试点工作的若干意见》中“在保证整体生态效益的前提下适当发展经济林”的退耕还林政策，将园地的重要性置于有林地与疏林地之间，以兼顾生态效益和经济效益。

4) 建设用地。建设用地的变化与流域经济、社会发展密切相关。在判别农用地转建设用地的合理性时，主要依据《环境保护法》第十九条和《土地管理法》第四十四条、第六十至六十二条，以通过环评、政府审批与否为主要标准，兼顾经济效益和社会效益；在判别建设用地转农用地的合理性时，主要参考《土地复垦条例》第四条和国土资源部部令《节约集约利用土地规定》第二条，以低效废弃地的再利用、提高土地利用效率为标准，兼顾生态效益与经济效益。

5) 水域。流域水域面积较小，且受气候年际变化的影响较大，故不对水域变化进行合理性评价。

2.4.2 合理度计算方法

为了分析退耕还林不同阶段各土地利用类型及总体变化的合理性，根据合理性判别准则，以土地利用转移数据为基础，将各地类变化的总面积分为变化合理和变化不合理 2 类，采用公式(2)计算各地类变化的合理度，并加和统计出 3 个时段的变化总面积和变化合理面积，进而计算各时段的土地利用变化合理度。利用 ArcGIS9.3 对基于 DEM 影像得到的流域坡度分级矢量图与前述 3 个时段的土地利用转移图层进行空间叠加分析并进行数据统计。

$$\text{土地利用变化合理度} = \frac{\text{变化合理的面积}}{\text{变化的总面积}} \times 100\% \quad (2)$$

2.4.3 合理度分级标准

采用杨子生等提出的分级标准^[14]，将土地利用变化合理性划分为 6 个等级(表 2)。

表 2 土地利用变化合理度分级标准
Table 2 Standard for gradation of rational degree of land use changes

合理性等级 Rationality level	合理度 Rational degree/%
高度合理 High rationality	≥90
中度合理 Moderate rationality	≥80~90
低度合理 Low rationality	≥65~80
低度不合理 Low irrationality	≥50~65
中度不合理 Moderate irrationality	≥25~50
高度不合理 High irrationality	<25

3 结果与分析

3.1 土地利用结构变化特征

在历时 15 a 退耕还林工程实施的过程中，除没有纳入退耕还林工程实施范围的东部和西北部山区一直以林地为主外，流域土地利用空间分布发生了很大变化，其中随着 3 个工程阶段的推进，土地利用调整的空间范围不断发生变化(图 2)。

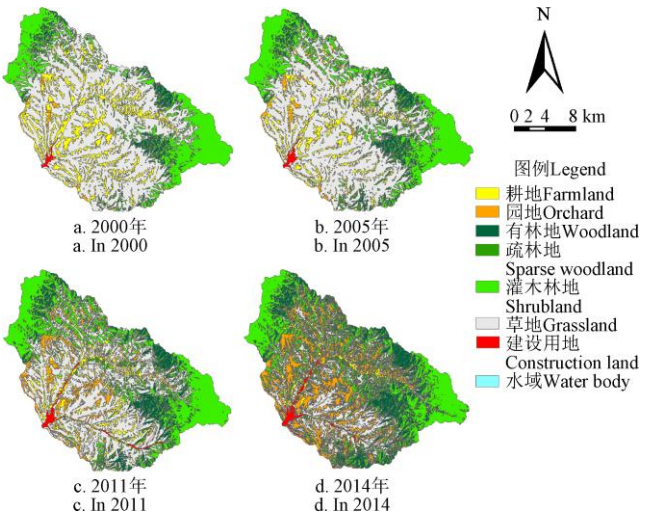


图 2 2000-2014 年清水河流域土地利用空间分布
Fig.2 Spatial distribution of land use in Qingshuihe watershed from 2000 to 2014

在工程实施前，草地分布范围广，园地分布零星；通过第 1 阶段工程的实施，耕地明显缩小，而流域上游地区林地明显扩大；第 2 阶段上游地区林地分布范围向中下游延伸，园地开始扩展，草地明显缩小；第 3 阶段林地与园地范围扩幅较大，而草地分布则继续减小。具体而言(表 3)，2000 年草地面积最大，占总土地面积的 55.75%，林地次之，占 28.98%，耕地则占 14.11%，而园地面积较小仅占 0.79%，主要土地利用类型耕地、园地、林地和草地的比例为 1:0.06:2.05:3.95。2005 年耕地和草地比例分别降至 9.19%和 52.76%，林地则升至 35.64%，园地和建设用地面积有一定增加，但增加规模总体不大，水域面积总体较小，所占比例变化不大。第 1 阶段主要土地利用类型耕地、园地、林地和草地的比例调整为 1:0.20:3.88:5.74，重点突出了工程的生态效益。2011 年耕地比例继续降至 7.62%，但因新建梯田的加入其降幅小于第 1 阶段，而林地和园地则分别升

至 41.69% 和 6.29%，草地面积虽仍最大，但其比例降至 43.19%。吉县县城主要位于流域内，随着城镇建设不断加快特别是 G22 青兰高速公路山西段的临吉高速公路于 2009 年 8 月开工建设，建设用地明显增加，所占比例为 1.21%。第 2 阶段耕地、园地、林地和草地的比例进一步调整为 1：0.82：5.47：5.67，总体特征是在巩固第 1 阶段成果的基础上，注重梯田、果园等民生项目建设，兼顾了生态、经济与社会效益。2014 年林地比例超

过草地大幅上升至 54.30%，跃居首位，草地降至 24.89%，园地比例超过耕地升至 14.52%，耕地则降至 4.51%，仅高于建设用地和水域。第 3 阶段耕地、园地、林地和草地的比例最终调整为 1：3.22：12.03：5.51，总体特征是随着前期退耕还林工程及植被演替效益的累积，林地面积增幅明显，生态环境继续改善，同时通过进一步加大苹果产业发展力度，园地面积迅速增加，重点突出了经济效益。

表 3 清水河流域 2000—2014 年土地利用结构
Table 3 Land use structure in Qingshuihe watershed from 2000 to 2014

土地利用类型 Land use type	2000 年		2005 年		2011 年		2014 年	
	面积 Area/hm ²	百分比 Percentage/%	面积 Area/hm ²	百分比 Percentage/%	面积 Area/hm ²	百分比 Percentage/%	面积 Area/hm ²	百分比 Percentage/%
耕地 Farmland	6 152.08	14.11	4 004.98	9.19	3 323.49	7.62	1 967.87	4.51
园地 Orchard	346.40	0.79	792.66	1.82	2 741.34	6.29	6 331.28	14.52
有林地 Woodland	2 158.51	4.95	3 064.51	7.03	4 493.52	10.31	6 787.80	15.58
疏林地 Sparse woodland	434.36	1.00	1 016.73	2.33	1 280.87	2.94	2 247.28	5.15
灌木林地 Shrubland	10 039.85	23.03	11 460.18	26.28	12 400.19	28.44	14 634.65	33.57
草地 Grassland	24 307.51	55.75	23 003.96	52.76	18 829.38	43.19	10 852.07	24.89
建设用地 Construction land	158.32	0.36	252.77	0.58	529.41	1.21	768.54	1.76
水域 Water body	2.97	0.01	4.21	0.01	1.80	0	10.51	0.02
总计 Total	43 600.00	100.00	43 600.00	100.00	43 600.00	100.00	43 600.00	100.00

3.2 土地利用转移特征

从表 4 可以看出，第 1 阶段转移有 2 个明显特征：耕地主要转向草地和园地，面积分别为 1 667.16 和 391.66 hm²；植被恢复效果明显，尤其以草地转灌木林地面积较大，达 1 831.92 hm²。期间建设用地的增加主要源自草地，水域面积的变化主要受气候年际变化的影响，但转变规模总体较小。第 2 阶段转移在保持了第 1 阶段总体态势的同时，出现了 2 个新的特征：耕地虽仍主要转向草地和园地，但转园面积（1 463.83 hm²）开始大于

转草面积（519.39 hm²），同时草地垦殖面积达 1 341.78 hm²，致使耕地面积降幅趋缓；草地转园面积明显增大，由第 1 阶段的 51.78 增加至 473.02 hm²。第 3 阶段转移的特征主要表现在 2 个方面：在耕地继续转向园地的同时，草地也大量转向园地，面积分别达 1 846.62 和 1 636.55 hm²；经过长达 15 a 的严格封禁，植被演替效果显现，林地面积继续增加，如草地转灌木林地和疏林地面积分别为 4 509.19 和 1 189.66 hm²，灌木林地转有林地 1 538.25 hm²。

表 4 清水河流域 2000—2014 年土地利用转移矩阵
Table 4 Transition matrix of land use in Qingshuihe watershed from 2000 to 2014

时段 Period	土地利用类型 Land use type	hm ²							
		耕地 Farmland	园地 Orchard	有林地 Woodland	疏林地 Sparse woodland	灌木林地 Shrubland	草地 Grassland	建设用地 Construction land	水域 Water body
2000—2005 年	耕地	3 999.45	391.66	0.41	4.44	53.77	1 667.16	35.00	0.19
	园地	0	344.98	0	0.01	0.05	1.36	0	0
	有林地	0.30	1.18	2 152.67	2.52	1.84	0	0	0
	疏林地	0	1.90	58.74	365.23	5.57	2.92	0	0
	灌木林地	1.99	1.16	392.57	68.03	9 567.03	8.89	0	0.18
	草地	2.51	51.78	460.12	576.50	1 831.92	21 316.55	66.24	1.89
	建设用地	0	0	0	0	0	6.79	151.53	0
2005—2011 年	水域	0.73	0	0	0	0	0.29	0	1.95
	耕地	1 908.02	1 463.83	6.37	2.89	34.73	519.39	69.48	0.27
	园地	9.20	772.40	1.50	0.78	3.07	5.70	0.01	0
	有林地	1.88	2.29	2 988.21	4.36	11.02	55.70	1.05	0
	疏林地	2.88	5.77	266.09	625.21	19.72	95.81	1.25	0
	灌木林地	50.52	23.66	818.94	86.49	10 387.77	85.74	7.06	0
	草地	1 341.78	473.02	412.41	561.14	1 943.02	18 058.91	213.29	0.39
2011—2014 年	建设用地	9.21	0.37	0	0	0	5.92	237.27	0
	水域	0	0	0	0	0.86	2.21	0	1.14
	耕地	1 269.65	1 846.62	0.80	2.91	12.78	38.93	147.17	4.63
	园地	12.42	2 624.00	1.86	0.51	41.10	51.61	9.84	0
	有林地	1.24	37.79	4 431.68	11.54	5.37	3.63	2.27	0
	疏林地	6.40	30.92	326.36	835.67	72.00	8.20	1.22	0.10
	灌木林地	125.88	151.31	1 538.25	205.59	9 992.49	375.86	10.28	0.53
2011—2014 年	草地	550.93	1 636.55	487.06	1 189.66	4 509.19	10 293.22	158.70	4.07
	建设用地	1.35	4.09	1.79	1.40	1.71	79.80	439.06	0.21
	水域	0	0	0	0	0.01	0.82	0	0.97

3.3 土地利用变化的合理性及主要影响因素

第 1 阶段各土地利用类型变化的总面积为 5 697.33 hm² (表 5), 其中耕地和草地变化面积较大, 分别占 37.78%和 52.46%。耕地变化的合理性等级为中度不合理, 主要原因为不合理的 15 °以下坡耕地转草面积在耕地变化中的比例较大, 占 53.77%, 致使耕地变化的合理度只有 44.53%。草地在林草优次顺序中位置最低, 由于除 25 °以上垦殖 (仅占变化总面积的 0.01%) 和未通过环评、审批的建设用地占用 (流域实际没有) 为不合理外, 其余变化全部合理, 故其合理性等级为高度合理。林地和园地变化面积总共只有 549.03 hm², 有林地、园地

变化的合理性等级均为高度不合理, 疏林地、灌木林地分别为中度合理和高度合理, 造成有林地、园地与灌木林地变化合理性水平出现明显差异的主要原因是优次顺序中的位置, 有林地、园地位置偏高, 变化过程中不合理面积的比例较大, 而灌木林地则正好相反。建设用地变化面积仅为 6.79 hm², 只涉及转草, 因属于废弃地的整理与开发再利用, 故其变化的合理性等级为高度合理。整个阶段的合理度为 78.60%, 评价结果为低度合理, 主要原因仍是 15 °以下坡耕地的不合理转草, 其面积占流域阶段变化总面积的 20.31%, 拉低了阶段土地利用变化合理性的总体水平。

表 5 清水河流域 2000—2014 年土地利用变化合理性评价
Table 5 Evaluation of rationality of land use changes in Qingshuihe watershed from 2000 to 2014

时段 Period	变化的地类 Changed land use type	变化总面积 Total area of change/hm ²	合理的面积 Rational area/hm ²	不合理的面积 Irrational area/hm ²	合理度 Rational degree/%	合理性等级 Rationality level
2000—2005 年	耕地 Farmland	2 152.44	958.45	1 193.99	44.53	中度不合理
	园地 Orchard	1.42	0	1.42	0	高度不合理
	有林地 Woodland	5.84	0	5.84	0	高度不合理
	疏林地 Sparse woodland	69.13	60.64	8.49	87.72	中度合理
	灌木林地 Shrubland	472.64	463.64	9.00	98.10	高度合理
	草地 Grassland	2 989.07	2 988.73	0.34	99.99	高度合理
	建设用地 Construction land	6.79	6.79	0	100.00	高度合理
	合计 Total	5 697.33	4 478.25	1 219.08	78.60	低度合理
2005—2011 年	耕地 Farmland	2 096.69	1 711.56	385.13	81.63	中度合理
	园地 Orchard	20.26	10.17	10.09	50.20	低度不合理
	有林地 Woodland	76.30	1.05	75.25	1.38	高度不合理
	疏林地 Sparse woodland	391.52	275.90	115.62	70.47	低度合理
	灌木林地 Shrubland	1 072.41	982.95	89.46	91.66	高度合理
	草地 Grassland	4 944.66	4 906.10	38.56	99.22	高度合理
	建设用地 Construction land	15.50	15.50	0	100.00	高度合理
	合计 Total	8 617.34	7 903.23	714.11	91.71	高度合理
2011—2014 年	耕地 Farmland	2 049.21	2 019.14	30.07	98.53	高度合理
	园地 Orchard	117.34	24.12	93.22	20.56	高度不合理
	有林地 Woodland	61.84	2.27	59.57	3.67	高度不合理
	疏林地 Sparse woodland	445.10	364.87	80.23	81.97	中度合理
	灌木林地 Shrubland	2 407.17	2 026.06	381.11	84.17	中度合理
	草地 Grassland	8 532.09	8 518.50	13.59	99.84	高度合理
	建设用地 Construction land	90.14	90.14	0	100.00	高度合理
	合计 Total	13 702.89	13 045.10	657.79	95.20	高度合理

第 2 阶段各土地利用类型变化的总面积升至 8 617.34 hm², 虽仍以耕地和草地为主, 但前者比例降至 24.33%, 后者比例则升至 57.38%, 同时林地变化面积已占 17.87%。耕地变化由第 1 阶段的中度不合理大幅度升至中度合理, 主要原因是转园面积较大, 其合理面积占其阶段变化总面积的 69.82%, 明显提升了合理性水平。草地继续保持高度合理, 其中转园合理面积明显增大。林地和园地中有林地和灌木林地变化仍分别为高度不合理和高度合理, 但疏林地由中度合理降至低度合理, 主要原因为不合理的转灌转草面积占其阶段变化总面积的 29.51%, 拉低了其合理性水平, 而园地则由高度不合理

升至低度不合理, 回升的主要原因是垦殖合理和改有林地面积占其阶段变化面积的 50.15%, 在一定程度上改善了合理性状态。建设用地变化面积增至 15.50 hm², 仍为高度合理。整个阶段的合理度大幅度升至 91.71%, 进入高度合理状态, 提升的主要原因是由于苹果产业发展、梯田新建和植被的恢复与演替, 如耕地转园合理面积占流域变化总面积的比例由第 1 阶段的 6.87%升至 16.99%, 草地利耕合理面积由 0.04%大幅度提升至 15.12%, 疏林地、灌木林地转有林地合理面积由 7.92%升至 12.59%。

第 3 阶段各土地利用类型变化的总面积大幅度升至 13 702.89 hm², 耕地变化面积比例继续降至 14.95%, 而

草地和林地比例分别继续升至 62.26% 和 21.27%。耕地变化的合理性从第 2 阶段的中度合理升至高度合理, 主要原因是转园合理面积占其阶段变化总面积的 90.11%, 继续提升了合理性水平。草地继续保持高度合理, 其中除转园合理面积继续增大外, 转林合理面积也大幅度增加。林地和园地内部出现了分化, 有林地仍为高度不合理, 园地由第 2 阶段的低度不合理降至高度不合理, 灌木林地由高度合理降至中度合理, 而疏林地由低度合理升至中度合理, 其中不合理的园地转灌转草面积占其阶段变化总面积的 79.01%, 灌木林地转草面积占 15.61%, 相应拉低了两地类的合理性水平, 疏林地则因转有林地和园地合理面积占其阶段变化总面积的 80.27%, 回升了合理性水平。建设用地变化面积增至 90.14 hm², 继续保持高度合理。整个阶段的合理度继续升至 95.20%, 保持了高度合理态势, 提升的主要原因是: 苹果种植规模的进一步扩大, 耕地和草地持续转向园地, 二者转园合理面积在流域变化总面积中的比例由第 2 阶段的 22.48% 上升至 25.42%; 植被恢复演替累积效益的显现, 疏林地转有林地、灌木林地转有林地和疏林地、草地转林地合理面积占流域变化总面积的比例由第 2 阶段的 47.44% 大幅度升至 60.25%。

从退耕还林 3 个阶段土地利用变化合理性的空间分布来看 (图 3), 除了东部和西北部山区外, 第 1 阶段高度和中度合理集中分布于流域上游, 中下游地区主要属于土地利用未发生变化或变化不合理的区域; 第 2 阶段高度和中度合理扩展至中下游地区, 土地利用未发生变化以及变化不合理的分布范围相应缩小; 第 3 阶段合理尤其是高度合理基本遍布流域全境, 土地利用未发生变化的范围则明显减小。土地利用合理性空间格局的这一变化特征, 既反映了流域退耕还林工程从生态效益优先向生态效益和经济、社会效益兼顾的转变, 也反映了流域内农业生产、农村经济发展 15 a 来的演变过程。

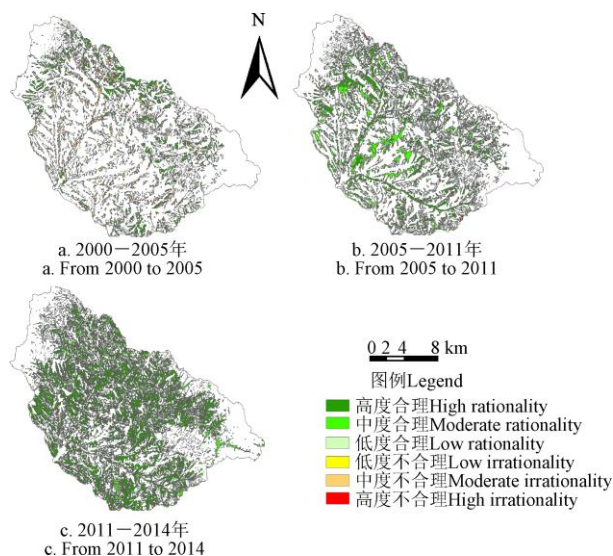


图 3 2000—2014 年清水河流域土地利用变化合理性空间分布
Fig.3 Spatial distribution of rationality of land use changes in Qingshuihe watershed from 2000 to 2014

4 讨论

4.1 土地利用变化数据源及合理性评价方法的扩展

退耕还林工程的实施直接改变了土地利用结构, RS、GIS 技术和合理度概念的应用为土地利用变化动态监测及合理性评价提供了有效的工具和方法。但从监测和评价过程来看, 仅依据现有遥感和 DEM 数据尚存在一定的局限性, 判别准则也不适合进行退耕还林工程的优化评价, 需要在进一步的研究中深入探讨。

1) 提高遥感影像的解译精度。本文在利用 4 期 Landsat 影像进行土地利用解译时发现, 单纯对影像进行监督分类可以通过地物光谱特征间的差异有效判读有林地、疏林地、灌木林地、草地、建设用地和水域, 但耕地与园地因裸地面积所占比重均较大, 二者在遥感影像中显示的光谱特征非常相似, 加之 4 期影像的空间分辨率只有 30 或 15 m, 对二者进行有效区分比较困难。Google Earth 中影像空间分辨率最高可达 0.6 m, 虽然对于有林地、疏林地、灌木林地和草地相互之间的区分不明显, 但对于耕地与园地二者之间、二者与其它地类之间可以进行有效识别。实践证明, 借助 Google Earth 高空间分辨率影像对 TM/ETM+ 影像的监督分类结果进行人工目视判读与修正, 可有效减少耕地与园地混合像元的影响, 各期影像的解译精度均达到了要求。随着国产高分系列卫星的投入使用, 高分辨率影像的获取与直接应用将更加便利。

2) 应用主管部门坡耕地梯改的工程数据。在计算土地利用变化合理度时, 需要将基于 DEM 影像得到的流域坡度分级矢量图与各个时段的土地利用转移图层进行空间叠加, 按照合理性判别准则, 统计出各地类变化合理的面积。由于数据的可获取性, 本研究以 2011 年公布的第 2 版 ASTER GDEM 数据作为整个研究时段的 DEM 数据, 由于无法监测到研究时段内地形特别是耕地坡度的动态变化, 不能对梯田与坡耕地进行有效区分, 故在计算土地利用变化合理度时, 除有林地任何坡度下转变为耕地被视为毁林外, 在流域大力开展梯改工程与基本农田建设的背景下, 将其它地类转变为 25° 以下耕地均视作建设具有水土保持功能的水平梯田, 并统计在变化合理的面积之内。为了进一步探讨耕地坡度分异的动态特征, 应结合林业部门退耕还林工程作业设计 and 水保部门坡改梯工程施工设计等的图表信息, 对耕地地块坡度的历史变化状况进行综合判别。

3) 进行土地利用变化的优化评价。土地利用类型变化的合理性直接关系到退耕还林工程的最大成效与最终效益, 本文运用转移矩阵揭示了各土地利用类型的转移流向, 进而通过构建合理性判别准则体系, 对清水河流域土地利用变化进行了合理性评价。从评价过程来看, 该方法能够满足退耕还林总体评价的基本要求。但退耕还林是一项历时较长、各方面投入都较大的系统工程, 在重点评价所取得的生态效益的同时, 还应定量评价其经济与社会效益, 因而在评价土地利用变化时, 应与区域近期、中期、远景生态保护、经济建设和社会发展对土地利

用的需求结合起来。进一步的研究可以通过将合理性评价方法与多目标规划方法^[28-29]等有机结合起来,以使对土地利用变化的合理性评价延伸至优化评价领域。

4.2 新一轮退耕还林工程中主要土地利用类型的调控

在流域退耕还林工程实施过程中,耕地、林地和园地的转移及面积变化在土地利用结构调整过程中起了主导作用。但从监测与合理性评价过程以及已有研究结果来看,这 3 大土地利用类型面积或增或减幅度过大,对区域生态环境和经济社会发展带来了一些不利影响,建议在新一轮退耕还林工程实施中引起足够关注。

1) 严格控制新的退耕,高度重视粮食自给能力。流域耕地面积从 2000 年的 6 152.08 hm² 大幅度减少至 2014 年的 1 967.87 hm²,降幅达 68.01%,潜在着粮食自给不足的风险。粮食安全问题将直接影响黄土高原退耕还林工程成果的巩固和生态恢复的可持续发展,目前黄土高原不少地方开始出现了不同程度的复垦现象^[30-31],实地调查也发现流域内一些退耕农户有复垦意愿。为了确保粮食安全并减轻对国家粮食补贴政策的长期依赖,首先应稳定现有耕地面积,15℃以下不再退耕,15~25℃严格控制退耕;其次,采取优良品种选育推广、间作套种、节水灌溉、精准施肥等多种措施,提高现有耕地的生产潜力;第三,对于 25℃尤其是 15℃以下宜农的弃园、弃林地以及荒地,可以通过梯改复垦,适当增加耕地存量。

2) 保护好现有林地,重点加强林木的抚育。流域林地面积从 2000 年的 12 632.72 hm² 大幅度增加至 2014 年的 23 669.73 hm²,增幅达 87.37%,目前已占总土地面积的 54.29%。黄土高原退耕还林对恢复植被、减轻土壤侵蚀、减少入黄泥沙等发挥了重要作用,研究表明,黄土高原植被覆盖率已从 1999 年的 31.6%提高至 2013 年的 59.6%^[32],黄河中游年均输沙量(潼关站)从 1990—1999 年的 7.9 亿 t 降至 2000—2014 年的 2.7 亿 t,降幅达 65.82%^[33],干流输沙量已恢复至唐朝农耕时期的水平^[32]。但森林植被的增加一方面减少地表径流,对下游地区生态与生产生活用水产生影响,研究表明,黄河中游年均径流量(潼关站)由 1990—1999 年的 249 亿 m³ 降至 2000—2014 年的 234 亿 m³,减少了 6.02%^[33],另一方面过度消耗深层土壤水分,形成土壤干层,反而制约了植被的可持续性恢复^[34]。因此,除了河流源头与沿岸、林场、村镇与古迹附近、交通沿线外,其它地区应控制新增林地,严格保护好现有林地,严禁发生新的乱砍滥伐,同时适当保留一定比例的草地,将林业建设的重点转向现有林木的抚育上,提高森林质量。

3) 适当控制园地规模,尽快提升苹果产业化经营水平。流域内园地规模扩展较快,面积从 2000 年的 346.40 hm² 大幅度增加至 2014 年的 6 331.28 hm²,增加了 17.28 倍,现已占总土地面积的 14.52%,是耕地面积的 3.22 倍,吉县 2014 年农业总收入的 80%和农民人均纯收入的 80%以上均来自于果业^[35]。黄土高原是中国近 10 余年来苹果种植发展较快的区域,但也存在经营粗放、品种单一、产后商品化处理落后、缺乏统一标准和质量安

全,国内外市场与中国华北平原、环渤海湾地区两大传统产区以及美、日、韩等国家竞争激烈等一系列问题^[36-37],这些问题势必将对流域苹果产业的可持续发展产生不利影响。因此,流域苹果产业发展不能再走面积扩张之路,既要注重水土保持效益,又要以产业化经营为核心,重点发展优质品种,大幅度提升果品质量,积极开拓国内外市场,同时将一些立地条件较差的低产果园改种干果。

5 结 论

本文利用 2000、2005、2011 和 2014 年 4 期遥感影像对黄土高原清水河流域 2000—2014 年退耕还林土地利用变化进行了监测分析,并通过构建判别准则体系对其进行了合理性评价,主要得到了以下结论。

1) 土地利用结构发生重大变化。经过大规模退耕还林、荒山造林、封山育林、果园建设和城镇发展,流域土地利用结构发生了深刻变化,耕地、草地面积大幅度减少,林地、园地面积大幅度增加,建设用地稳定增长,主要土地利用类型耕地、园地、林地和草地的比例由 2000 年的 1:0.06:2.05:3.95 大幅度调整至 2014 年的 1:3.22:12.03:5.51,植被恢复与重建成效明显,土地资源得到了有效保护,土地利用结构趋于合理,有利于根治水土流失和减少入黄泥沙。

2) 土地利用变化合理性大幅度提升。流域第 1 轮退耕还林工程的 3 个阶段以生态整治为起始点并贯穿全过程,不断加大退耕农户致富能力的培育力度,土地利用变化合理度由 78.60%大幅度升至 95.20%,实现了从低度合理到高度合理的转变,有利于流域生态系统服务功能的提升和经济社会的可持续发展,为推进新一轮退耕还林工程的优化奠定了坚实基础。

[参 考 文 献]

- [1] Fu B J, Liu Y, Lü Y H, et al. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China[J]. *Ecological Complexity*, 2011, 8(4): 284—293.
- [2] Gao G Y, Fu B J, Wang S, et al. Determining the hydrological responses to climate variability and land use/cover change in the Loess Plateau with the Budyko framework[J]. *Science of the Total Environment*, 2016(557/558): 331—342.
- [3] Gao P, Mu X M, Wang F, et al. Changes in streamflow and sediment discharge and the response to human activities in the middle reaches of the Yellow River[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(1): 1—10.
- [4] Zhao G J, Mu X M, Wen Z M, et al. Soil erosion, conservation, and eco-environment changes in the Loess Plateau of China[J]. *Land Degradation & Development*, 2013, 24: 499—510.
- [5] 徐学选, 刘普灵, 琚彤军, 等. 黄土丘陵区燕沟流域水土流失治理的水沙效应[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(3): 113—117.

- Xu Xuexuan, Liu Puling, Ju Tongjun, et al. Effects of soil and water loss control on reducing runoff and sediment transport in Yan'gou watershed of loess hilly region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(3): 113—117. (in Chinese with English abstract)
- [6] 郝明德. 黄土高原沟壑区小流域综合治理模式: 以长武王东沟小流域为例[J]. 水土保持通报, 1996, 16(1): 68—72.
- Hao Mingde. Model of comprehensive harnessing at small watershed in gullied region of Loess Plateau: A case study at Wangdong gully small watershed in Changwu County[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1996, 16(1): 68—72. (in Chinese with English abstract)
- [7] Jiang C, Wang F, Zhang H Y, et al. Quantifying changes in multiple ecosystem services during 2000-2012 on the Loess Plateau, China, as a result of climate variability and ecological restoration[J]. Ecological Engineering, 2016, 97: 258—271.
- [8] Lü Y H, Fu B J, Feng X M, et al. A policy-driven large scale ecological restoration: Quantifying ecosystem services changes in the Loess Plateau of China[J]. Plos One, 2012, 7(2): 1—10.
- [9] Yin R S, Liu C, Zhao M J, et al. The implementation and impacts of China's largest payment for ecosystem services program as revealed by longitudinal household data[J]. Land Use Policy, 2014, 40: 45—55.
- [10] Wang S, Fu B J, Piao S L, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes[J]. Nature Geoscience, 2016, 9: 38—41.
- [11] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J]. 地理学报, 2014, 69(1): 3—14.
- Liu Jiyuan, Kuang Wenhui, Zhang Zengxiang, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(1): 3—14. (in Chinese with English abstract)
- [12] 罗娅, 杨胜天, 刘晓燕, 等. 黄河河口镇—潼关区间 1998—2010 年土地利用变化特征[J]. 地理学报, 2014, 69(1): 42—53.
- Luo Ya, Yang Shengtian, Liu Xiaoyan, et al. Land use change in the reach from Hekouzhen to Tongguan of the Yellow River during 1998-2010[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(1): 42—53. (in Chinese with English abstract)
- [13] 文洁, 刘学录. 基于改进 TOPSIS 方法的甘肃省土地利用结构合理性评价[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(4): 234—239.
- Wen Jie, Liu Xuelu. Assessment of rationality of land use structure in Gansu Province based on improved TOPSIS method[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(4): 234—239. (in Chinese with English abstract)
- [14] 杨子生, 韩华丽, 朱玉碧, 等. 退耕还林工程驱动下的土地利用变化合理性研究: 以云南芒市为例[J]. 自然资源学报, 2011, 26(5): 733—745.
- Yang Zisheng, Han Huali, Zhu Yubi, et al. The rationality evaluation of land use changes in the middle and low mountain basin and valley area of southwest Yunnan Province driven by the national project of converting farmland to forest: A case study in Luxi City[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(5): 733—745. (in Chinese with English abstract)
- [15] 王秀兰, 包玉海. 土地利用动态变化研究方法探讨[J]. 地理科学进展, 1999, 18(1): 81—87.
- Wang Xiulan, Bao Yuhai. Study on the methods of land use dynamic change research[J]. Progress in Geography, 1999, 18(1): 81—87. (in Chinese with English abstract)
- [16] 李团胜, 马超群. 从土地利用变化看陕西省生态环境的转变[J]. 干旱区地理, 2005, 28(5): 647—653.
- Li Tuansheng, Ma Chaoqun. Evolution of ecological environment from land use change in Shaanxi Province[J]. Arid Land Geography, 2005, 28(5): 647—653. (in Chinese with English abstract)
- [17] 朱会义, 李秀彬. 关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论[J]. 地理学报, 2003, 58(5): 643—650.
- Zhu Huiyi, Li Xiubin. Discussion on the index method of regional land use change[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(5): 643—650. (in Chinese with English abstract)
- [18] Chen N, Ma T Y, Zhang X P. Responses of soil erosion processes to land cover changes in the Loess Plateau of China: A case study on the Beiluo River basin[J]. Catena, 2016, 136: 118—127.
- [19] 和继军, 蔡强国, 刘松波. 次降雨条件下坡度对坡面产流产沙的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(5): 1263—1268.
- He Jijun, Cai Qiangguo, Liu Songbo. Effects of slope gradient on slope runoff and sediment yield under different single rainfall conditions[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(5): 1263—1268. (in Chinese with English abstract)
- [20] 刘淑燕, 秦富仓, 项元和, 等. 基于 WEPP 模型进行坡度

- 因子与侵蚀量关系研究[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(4): 97—101.
- Liu Shuyan, Qin Fucang, Xiang Yuanhe, et al. Study on the relationship between slope and the amount of soil loss based on WEPP[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20(4): 97—101. (in Chinese with English abstract)
- [21] 靳长兴. 论坡面侵蚀的临界坡度[J]. 地理学报, 1995, 50(3): 234—239.
- Jin Changxing. A theoretical study on critical erosion slope gradient[J]. Acta Geographica Sinica, 1995, 50(3): 234—239. (in Chinese with English abstract)
- [22] 蒋定生. 黄土高原水土流失与治理模式[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.
- [23] 程积民. 黄土区植被的演替[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(5): 58—61.
- Cheng Jimin. Vegetation succession in loess area[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1999, 5(5): 58—61. (in Chinese with English abstract)
- [24] 王晓宁, 向家平, 赵廷宁, 等. 晋西黄土丘陵沟壑区植被演替规律研究[J]. 水土保持通报, 2009, 29(3): 103—107.
- Wang Xiaoning, Xiang Jiaping, Zhao Tingning, et al. A study of vegetation succession in the loess hill and gully area of western Shanxi Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29(3): 103—107. (in Chinese with English abstract)
- [25] Guo Q K, Hao Y F, Liu B Y. Rates of soil erosion in China: A study based on runoff plot data[J]. Catena, 2015, 124: 68—76.
- [26] Sun W Y, Shao Q Q, Liu J Y, et al. Assessing the effects of land use and topography on soil erosion on the Loess Plateau in China[J]. Catena, 2014, 121: 151—163.
- [27] Zhou J, Fu B J, Gao G Y, et al. Effects of precipitation and restoration vegetation on soil erosion in a semi-arid environment in the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2016, 137: 1—11.
- [28] 王红瑞, 张文新, 胡秀丽, 等. 土地利用区间数多目标规划模型及其应用[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 68—73.
- Wang Hongrui, Zhang Wenxin, Hu Xiuli, et al. Model of interval multi-objective programming of land-use and its application[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(8): 68—73. (in Chinese with English abstract)
- [29] 曾吉彬, 邵景安, 魏朝富, 等. 西南山地丘陵区永久性基本农田的多目标决策划定方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(16): 263—274.
- Zeng Jibin, Shao Jing'an, Wei Chaofu, et al. Delimitation of permanent basic farmland in mountain and hill areas in southwest China based on multiple-objective decision model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(16): 263—274. (in Chinese with English abstract)
- [30] 王兵, 刘国彬, 张光辉, 等. 黄土高原实施退耕还林(草)工程对粮食安全的影响[J]. 水土保持通报, 2013, 33(3): 241—245.
- Wang Bing, Liu Guobin, Zhang Guanghui, et al. Effects of Grain for Green project on food security on Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(3): 241—245. (in Chinese with English abstract)
- [31] 刘忠, 李保国. 退耕还林工程实施前后黄土高原地区粮食生产时空变化[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11): 1—8.
- Liu Zhong, Li Baoguo. Spatial and temporal changes in grain production before and after implementation of Grain for Green project in Loess Plateau region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(11): 1—8. (in Chinese with English abstract)
- [32] Chen Y P, Wang K B, Lin Y S, et al. Balancing green and grain trade[J]. Nature Geoscience, 2015, 8: 739—741.
- [33] Shi H L, Hu C H, Wang Y G, et al. Analyses of trends and causes for variations in runoff and sediment load of the Yellow River[J/OL]. International Journal of Sediment Research, 2016, DOI: 10.1016/j.ijsrc.2016.09.002.
- [34] Wang Y Q, Shao M A, Zhu Y J, et al. Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(4): 437—448.
- [35] 贺隼, 贺晓璐. “金苹果”铺出富民大道: 吉县扶贫攻坚发展苹果产业纪实[N]. 山西日报, 2014-10-15(C9).
- [36] 赵玉山. 我国苹果产业发展趋势、存在问题及对策[J]. 河北果树, 2014(4): 1—2.
- [37] 马锋旺. 加快西北黄土高原苹果产业发展的思考[J]. 科学种养, 2006(4): 4—6.

Land use change driven by Sloping Land Conversion Program in typical watershed on Loess Plateau and its rationality evaluation

Wang Bin, Zhang Zhiqiang^{*}

(1. Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating of State Forestry Administration, College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Jixian National Forest Ecosystem Observation and Research Station, Linfen 042200, China)

Abstract: To combat the severe soil erosion and improve the regional eco-environment, the Chinese central government initiated the Sloping Land Conversion Program (SLCP) in 1999. This program implemented on the Loess Plateau has resulted in dramatic land use change in the region. It is of significance to understand the land use change and its rationality for developing effective strategies in the next period of the program in the region. In this study, we explored the spatiotemporal characteristics of land use change over 2000-2014 in Qingshuihe Watershed(436 km²) located in the west Shanxi Province, a typical watershed on the Loess Plateau. Land use data for 2000, 2005, 2011 and 2014 were interpreted from TM/ETM+ images by using the supervised classification method. To improve the interpretation accuracy, the high-resolution images of Google Earth were used to revise the supervised classification results. The concept of rational degree was introduced for evaluating the rationality of land use change. The discriminant criterion for rationality was developed based on the integrated analysis of ordinances, regulations, and policy of SLCP as well as the studies about soil erosion and vegetation succession on the Loess Plateau. The results showed that the land use structure of the watershed had changed significantly. Land use ratio of farmland: orchard: forestland: grassland was evolved from 1:0.06:2.05:3.95 in 2000 to 1:3.22:12.03:5.51 in 2014. From 2000 to 2005, the percentage of farmland and grassland decreased to 9.19% and 52.76%, while the percentage of orchard and forestland increased to 1.82% and 35.64% respectively. Incited by the favorable subsidy of SLCP, farmland on gentle slope(<15°) was even converted to forestland and grassland, leading to the low rational level of land use change with the rational degree of only 78.60%. In order to improve the livelihood of the program participating farmers, the local government carried out the construction of basic farmland and orchard actively in 2005-2011. Some grassland was converted to high-quality basic farmland, but at the same time large amounts of sloping farmland and grassland were converted to orchard, leading to the decrease of farmland and grassland and increase of orchard. The percentage of farmland and grassland decreased to 7.62% and 43.19% respectively, while the percentage of orchard increased to 6.29% during this period. Moreover, forestland coverage increased from 35.64% to 41.69%. The overall rational degree of land use change increased to 91.71% that was a high rational level. With the further expansion of apple tree planting from 2011 to 2014, farmland and grassland were continuously converted to orchard. The percentage of orchard increased to 14.52%, while the percentage of farmland and grassland decreased to 4.51% and 24.89%, respectively. Forestland had been increasing constantly up to 54.30% of the total watershed. The overall rational degree of land use change was up to 95.20%. We suggest that the ultimate objectives of SLCP should be focused on achieving the balanced tradeoffs between grain production, economic trees and ecological forests and the integration in the policy instrument for implementing more effectively the program. More specifically, major efforts for next period of SLCP for this watershed should be implemented by improving the stability, structure and function of current ecological plantation forests established while maintaining a reasonable farmland scale and controlling the expansion of orchard.

Keywords: land use; remote sensing; vegetation; Sloping Land Conversion Program; rational degree; Loess Plateau